

EVALUACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE UNA RED WIMAX MÓVIL EN UN ESCENARIO DE ALTA MOVILIDAD

José Javier Solvas Morcillo⁽¹⁾, Bazil Taha Ahmed⁽²⁾
jsolvomor@gmail.com, bazil.taha@uam.es

⁽¹⁾Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Avenida Complutense, 30, "Ciudad Universitaria", Grupo de Radiación C-415.

⁽²⁾Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones. Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid. Carretera Colmenar Viejo, km. 15, Madrid.

Abstract—The aim of this paper is to evaluate the performance of mobile WiMAX technology for users in a highly mobility scenario for an operating frequency of 3.5 GHz. By utilizing a modified version of the extended Erceg's propagation model, based on the introduction of Rayleigh fading due to multipath, we have calculated the received desired power and the interference power to obtain the statistical signal-to-interference-plus-noise rate (as a function of mean value and variance of co-channel interference) and the user throughput. A rural scenario composed of a transmitting base station and users in moving vehicles along a cell sector is proposed. The obtained results about coverage and throughput have been simulated by a tool built in MATLAB.

I. INTRODUCCIÓN

El término WiMAX es un acrónimo compuesto por las palabras inglesas Worldwide Interoperability for Microwave Access y que en castellano puede traducirse como Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas. Esta norma de transmisión de datos representa al estándar IEEE 802.16d/e/j/m que proporciona acceso inalámbrico de banda ancha para terminales fijos y móviles. Este protocolo ofrece una gran variedad de servicios, incluyendo voz, datos y contenidos multimedia para bandas licenciadas y no licenciadas comprendidas entre 2.3 y 5.8 GHz.

En este artículo se ha estudiado el protocolo IEEE 802.16e comúnmente conocido como WiMAX Móvil y caracterizado por el uso de la tecnología SOFDMA (una variación de la tecnología OFDMA) [1]. En este caso, hemos analizado las prestaciones de esta tecnología enfocadas en el enlace descendente, es decir, desde la estación base (BS) hasta la estación móvil (MS). Estas prestaciones han sido evaluadas mediante el análisis de la calidad de señal WiMAX y del throughput percibidos por cada usuario móvil en un sector de celda de 120 grados.

En este contexto, la literatura de este campo muestra varias contribuciones que han sido publicadas en los últimos años. Por ejemplo, Alim [2] discutió los retos sobre la cobertura y el throughput en WiMAX móvil para la frecuencia de 3.5 GHz a través de un estudio estadístico y simulaciones en tiempo real para determinar los efectos de respuesta de su modelo de canal con técnicas de corrección de errores de transmisión de datos (FEC) cuando se diseña una red IEEE 802.16e. Por otra parte, Deruyck [3] investigó las prestaciones de los sistemas basados

en el estándar 802.16e con distintos perfiles de parámetros de su capa física y para canales de propagación reales como pueden ser el canal Rayleigh y el modelo SUI. Por último, se puede destacar el trabajo de Arafat [4] donde analizó la influencia de varias tasas de datos, esquemas de codificación y técnicas de modulación para investigar el comportamiento de las prestaciones de WiMAX móvil.

A continuación se describirá el modelo de sistema WiMAX que permite evaluar la cobertura y throughput haciendo uso de una modificación sobre el modelo de propagación Erceg [5]. La novedad de este artículo radica en la estimación del valor medio y la varianza de la potencia de interferencia cocanal que puede recibir cada usuario móvil. Con estos fundamentos el enlace descendente de WiMAX Móvil puede caracterizarse en función del valor del índice de señal a ruido e interferencia (SINR) para la frecuencia de 3.5 GHz.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección II, se presentan nociones de la capa física de WiMAX Móvil. La sección III describe el modelo de evaluación del sistema y las métricas de prestaciones en la sección IV. Los resultados obtenidos son analizados en la sección V mientras que la sección VI extrae las conclusiones.

II. LA CAPA FÍSICA DE WIMAX MÓVIL

El estándar IEEE 802.16/WiMAX Móvil está construido sobre los principios de la modulación OFDM, adoptando concretamente el esquema de una capa física basada en OFDMA escalable (SOFDMA) [6]. SOFDMA soporta una variedad amplia de anchos de banda para abordar con flexibilidad tanto la necesidad de asignación de espectro variada como sus requerimientos de aplicación.

La Tabla I resume algunos de los parámetros más significativos de la capa física de WiMAX móvil.

Parámetro	Valor
Tamaño FFT	128, 512, 1024 y 2048
Ancho de banda de canal (MHz)	1.25, 5, 10 y 20
Separación frecuencia subportadora (kHz)	10,94
Periodo de símbolo útil (μs)	91,4
Tiempo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32

Tabla I. Parámetros de la Capa Física de OFDMA.

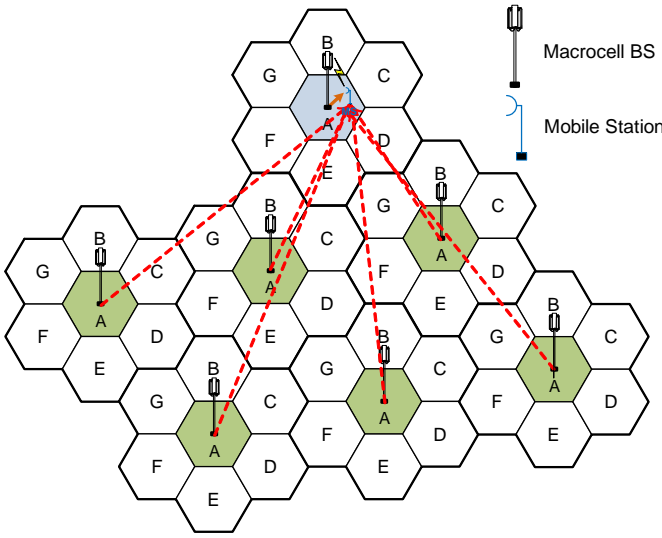


Figura 1. Diseño del Esquema Celular para WiMAX Móvil.

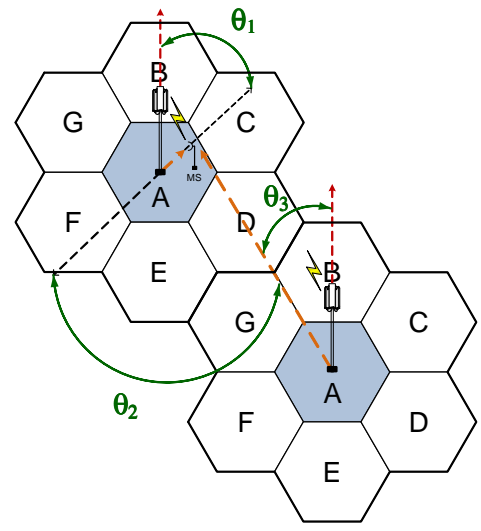


Figura 2. Esquema Reducido entre la Celda de Estudio y una Celda Cocanal.

III. MODELO DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA

A. Consideraciones Generales

En este estudio se ha propuesto un esquema celular compuesto por 7 clusters con 7 celdas cada uno como refleja la Fig. 1. Por simplicidad, sólo se considerarán las estaciones base ubicadas en las celdas centrales de cada cluster cuyas antenas implícitas tendrán un carácter directivo. El radio de cada celda será de R km y variará en función de los parámetros del sistema IEEE 802.16e. La antena de cada BS estará montada en una torre con una altura de 30 m, operando en condiciones NLOS, con un ancho de banda de 10 MHz por sector y una frecuencia de operación de 3,5 GHz.

B. Balance de enlace

La Fig. 2 ilustra el procedimiento para el cálculo del balance de enlace entre la BS y la MS de la celda de estudio y una de las seis BS interferentes.

Las expresiones del nivel de señal S e interferencia I que recibe una MS son las siguientes:

$$S = P_{TX} + G_{TX_{\theta_1}} + G_{RX_{max}} - L_{P_S} \quad (1)$$

$$I_n = P_{TX} + G_{TX_{\theta_3}} + G_{RX_{\theta_2}} - L_{P_{I_n}} \quad (2)$$

donde:

- P_{TX} es la potencia transmitida por la BS de la celda de estudio;
- G_{TX} and G_{RX} son las ganancias de la antena de la BS de la celda de estudio y la MS, respectivamente;
- L_{P_S} es la pérdida de propagación entre la BS de estudio y la MS;
- $L_{P_{I_n}}$ es la pérdida de propagación causada por la BS interferente sobre la celda de estudio.

C. Modelo de Propagación

Se empleará una versión modificada sobre el modelo de Erceg extendido [5] para evaluar las características de propagación en el medio inalámbrico.

Las pérdidas debido a la trayectoria de propagación del modelo de Erceg están dadas por la siguiente ecuación:

$$P_L = P_{L_{Erceg}} + X_{Ry} + L_g + \sigma_{sh} Q^{-1}(\alpha) \quad (3)$$

Con respecto a la ecuación (3):

- $P_{L_{Erceg}}$ es la pérdida de camino de Erceg [5];
- X_{Ry} representa el margen de desvanecimiento Rayleigh debido al multicamino. Su valor es 3 dB;
- L_g hace referencia a la pérdida por cristal del vehículo de la MS. Presenta un valor de 6 dB a una frecuencia de 3,5 GHz;
- σ_{sh} es la desviación estándar de shadowing que, para una zona rural, tiene un valor de 5 dB, y;
- $Q^{-1}(\alpha)$ denota la función gaussiana evaluada sobre un intervalo de confianza α igual al 99%.

D. Modelo de Interferencia Cocanal

El estudio de la propagación de la interferencia I en este sistema se ha realizado considerando que la potencia de interferencia cocanal puede tener una interpretación estadística en función de su valor medio $E(I)$ y su varianza $Var(I)$.

Las ecuaciones (4) y (5) son los estadísticos que permiten modelar la interferencia cocanal sobre la celda de estudio.

$$E[I] = e^{\beta^2 \frac{\sigma^2}{2}} \sum_{n=1}^N I_n Q \left(\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \left(\frac{I_n}{S} \right)}{\sigma} \right) \quad (4)$$

$$Var[I] = e^{2\beta^2 \sigma^2} \sum_{n=1}^N I_n^2 \left\{ g \left(\frac{I_n}{S} \right) - f^2 \left(\frac{I_n}{S} \right) \right\} \quad (5)$$

$$g \left(\frac{I_n}{S} \right) = Q \left(2\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \left(\frac{I_n}{S} \right)}{\sigma} \right) \quad (6)$$

$$f \left(\frac{I_n}{S} \right) = Q \left(\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \left(\frac{I_n}{S} \right)}{\sigma} \right) \quad (7)$$

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_{sh}^2 \quad (8)$$

Donde:

- $\beta = \ln(10)/10$;
- σ es la desviación estándar efectiva del shadowing usado para representar el incremento de interferencia debido a la correlación dada entre las BSs y los caminos de propagación hacia la MS como muestra la ecuación (8);
- N es el número de BSs coccanales a la celda de estudio;
- C_{do} es el coeficiente de correlación de shadowing entre emplazamientos reflejado en la ecuación (8).

E. Desvanecimiento Multicamino y Efecto Doppler

En este escenario de simulación se ha tenido en cuenta el efecto del desvanecimiento Rayleigh producido como consecuencia de la señal de interferencia constructiva y destructiva recibida por la MS a través de múltiples caminos.

Además, el parámetro Doppler también ha sido incluido en el sistema con el objetivo de proporcionar información sobre la tasa de desvanecimiento del canal según la velocidad de la MS a partir de la ecuación (9):

$$f_d = f_c \frac{v_{MS}}{c} \quad (9)$$

IV. MÉTRICAS DE PRESTACIONES PARA WiMAX MÓVIL

La estimación de las prestaciones de una transmisión/recepción WiMAX Móvil se ha realizado teniendo en cuenta dos magnitudes específicas de un sistema de comunicaciones, como son la $SINR$ y el throughput. A continuación se caracterizarán ambos términos.

A. $SINR$ por Subportadora

La ecuación (10) muestra la $SINR$ instantánea de la subportadora n -ésima de una MS que está conectada a la BS de estudio y que es utilizada para definir la calidad de servicio recibida por cada usuario en una celda.

$$SINR = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{WiMAX}^{sc}}{P_N^{sc} + I_{WiMAX}^{sc}} \right) \quad (10)$$

$$I_{WiMAX}^{sc} = \left(E[I] + Q^{-1}(\alpha) \sqrt{Var} \right)_{WiMAX}^{sc} + I_{ICI} \quad (11)$$

Los parámetros de la ecuación anterior son los siguientes:

- S es la potencia WiMAX recibida por subportadora en cada MS;
- P_N es el ruido térmico por subportadora como función del ancho de banda del sistema y del factor de ruido;
- ICI es la interferencia entre portadora debida al efecto Doppler entre las subportadoras WiMAX [1]. El cálculo del valor de ICI se muestra en las ecuaciones (12) y (13).

$$SINR_m = \frac{\left| \frac{\sin(\pi \Delta)}{N \sin(\frac{\pi}{N} \Delta)} \right|^2}{1 - \left| \frac{\sin(\pi \Delta)}{N \sin(\frac{\pi}{N} \Delta)} \right|^2 + \frac{1}{SINR_s}} \quad (12)$$

$$ICI = 10^{-SINR_m/10} \quad (13)$$

Con respecto a estas últimas ecuaciones:

- $SINR_m$ es la $SINR$ de WiMAX móvil con la interferencia entre portadora ICI ;

- Δ es la relación entre la frecuencia Doppler f_d y la frecuencia de separación entre subportadora f_{sp} ;
- N es el número de subportadoras, en este caso, 1024;
- $SINR_s$ es la $SINR$ para un usuario estacionario.

En nuestras simulaciones para cada MS todas las $SINR$ instantáneas de las subportadora de datos del burst del enlace descendente son recopiladas según el modo de asignación DL PUSC, y consideradas como una única $SINR$ efectiva.

B. Throughput por Usuario Móvil

A través de la $SINR$ podemos seleccionar el esquema de modulación y codificación (MCS) para cada usuario móvil y, por tanto, agrupar la información necesaria para determinar el throughput recibido por cada MS en un instante dado.

La Tabla II muestra las velocidades de enlace requeridas según el umbral de $SINR$ para evaluar en cada instante de tiempo el throughput neto recibido por cada estación de usuario.

En nuestro simulador el throughput neto por usuario ρ es calculado siguiendo la ecuación 14:

$$\rho = \log_2 M \cdot N_{ds} \cdot \frac{1}{T_s} \cdot R_{FEC} \cdot R_{RS} \cdot \frac{1}{1 + T_g} \cdot \frac{DL}{DL + UL} \quad (14)$$

donde:

- M representa el orden de modulación usado;
- N_{ds} es el número de subportadoras de datos igual a 720;
- T_s es el tiempo de símbolo útil equivalente a 91,4 μs ;
- R_{FEC} hace referencia a la tasa de codificación FEC;
- R_{RS} representa la tasa de codificación Reed-Solomon con un valor de 223/255 y;
- $\frac{1}{1+T_g} \cdot \frac{DL}{DL+UL}$ representa la atenuación causada por el tiempo de guarda y el tiempo de downlink útil sobre el tiempo total, que es del orden del 60% para el caso peor.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

La Tabla III muestra los parámetros de nivel de sistema usados para procesar resultados sobre un entorno rural. En este contexto hemos asumido que la potencia de transmisión es 40 dBm por sector de celda y que la altura de la antena del receptor móvil es 2 metros.

Modulación	Tasa de Código	Umbral de SINR (dB)
QPSK	1/2	3.5
	3/4	6.5
16QAM	1/2	9
	3/4	12.5
	2/3	16.5
	3/4	18.5

Tabla II. Niveles MCS y SINR con Turbo Códigos (CTC).

Variables	Escenario rural
Altura de antena BS (m)	30
Altura de antena MS (m)	2
Ganancia de antena MS (dBi)	0
Desviación estándar de shadowing (σ_{sh}) (dB)	5
Confianza (%)	99
Coeficiente de correlación entre emplazamientos (C_{do})	0.5
Ancho de haz de antena BS ($^\circ$)	120

Tabla III. Parámetros Usados en las Simulaciones.

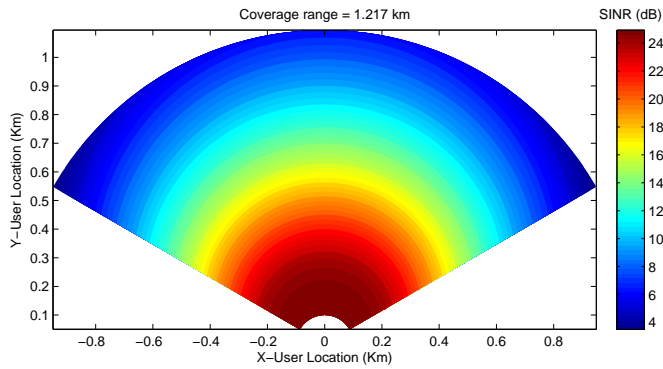


Figura 3. SINR efectiva puntual con respecto a las interferencias de las BSs cocanales para una velocidad de usuario de 100 Km/h.

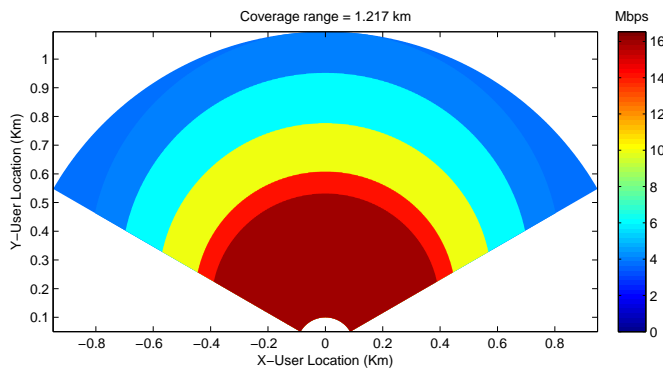


Figura 4. Throughput puntual del enlace descendente para una velocidad de usuario de 100 Km/h.

En primer lugar, estudiaremos el caso de una estación móvil que se desplaza a una velocidad de 100 Km/h sobre la celda de estudio.

La Fig. 3 y la Fig. 4 representan la *SINR* del enlace descendente y el throughput por usuario para un ancho de haz de la antena de transmisión de 120 grados. Se puede observar, que para una velocidad de 100 Km/h todos los esquemas de modulación son soportados alcanzando un rango máximo de cobertura de 1217 metros y una variación de throughput desde 16,2 Mbps hasta 3 Mbps.

Ahora, cuando la velocidad es incrementada a 300 Km/h, la Fig. 5 muestra una variación del rango de cobertura con un valor de 1201 metros con una pérdida de dos órdenes de modulación (64 QAM CTC 3/4 y 64 QAM CTC 2/3). Por otra parte, el throughput de la Fig. 6 decrece un 33% en comparación con la Fig. 4 siendo admitidos sólo las 4 velocidades correspondientes a QPSK y 16QAM.

Por tanto, de las figuras anteriores se puede deducir que una variación de la velocidad de 200 Km/h produce una reducción de la *SINR* del 38% para distancias cercanas a la BS. Además, la eficiencia espectral también se ve reducida de un valor de 1.653 bps/Hz (64 QAM 3/4 para un usuario a 100 Km/h) a 1.102 (16 QAM 3/4 para un usuario a 300 Km/h), que supone un 33.3% de reducción debida a 2 cambios de velocidad de enlace.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados simulados permiten evaluar la cobertura y el throughput para un enlace WiMAX Móvil a una frecuencia

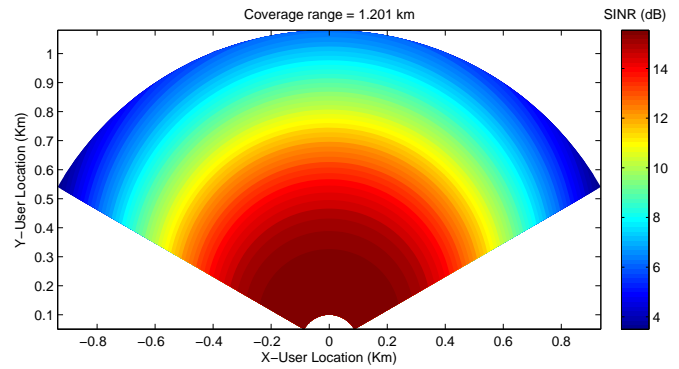


Figura 5. SINR efectiva puntual con respecto a las interferencias de las BSs cocanales para una velocidad de usuario de 300 Km/h.

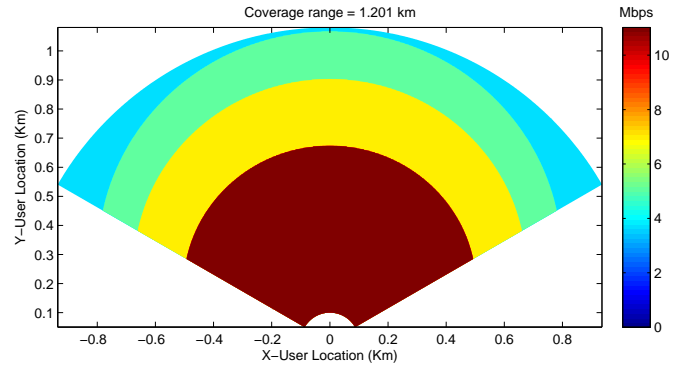


Figura 6. Throughput puntual del enlace descendente para una velocidad de usuario de 300 Km/h.

de 3,5 GHz.

Para un entorno rural y una serie de parámetros de la capa física de WiMAX se han obtenido valores para cuantificar la calidad de servicio de la señal WiMAX sobre un usuario móvil a las velocidades de 100 y 300 Km/h. En estas circunstancias, el rango de cobertura ha superado los 1000 metros y los valores de throughput han oscilado entre 16,53 Mbps para 64QAM 3/4 y 3.67 Mbps para QPSK 1/2.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen la financiación para este estudio procedente del Subprograma PTA del Ministerio de Ciencia e Innovación y del Proyecto Crocante TEC-2008-06736-C03-01 del Grupo de Radiación de la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 802.16e-2005, *Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, February, 2006.
- [2] O.A. Alim and A.E. Naggary, "Coverage vs Throughput Challenges in Mobile WiMAX." In NRSC'09, National Radio Science Conference, pp.1-9, New Cairo, Egypt, 2009.
- [3] M. Deruyck and E. Tanghe, "Performance Analysis of WiMAX for Mobile Applications." In WCNC'10, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.1-6, Sydney, Australia, 2010.
- [4] O. Arafat and K. Dimiyati, "Performance Parameter of Mobile WiMAX: A Study on the Physical Layer of Mobile WiMAX under Different Communication Channels and Modulation Technique." In ICCEA'10, 2nd International Conference on Computer Engineering and Applications, pp. 533-537, Bali Island, Indonesia, 2010.
- [5] J.G. Andrews and A. Gosh, *Fundamentals of WiMAX. Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall Press.
- [6] H. Yaghoobi, "Scalable OFDMA Physical layer in IEEE 802.16 wirelessMAN " Intel. Jun. 2006.